

Научная статья

Original article

УДК 338.431.7 + 502.3

DOI 10.55186/25876740_2023_7_4_1

**МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ И УСТОЙЧИВЫХ
АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ СИСТЕМ С НИЗКИМ УГЛЕРОДНЫМ
СЛЕДОМ**

**DESIGN MODELS FOR EFFICIENT AND SUSTAINABLE AGRIFOOD SYSTEMS
WITH A LOW CARBON FOOTPRINT**



Сиптиц Станислав Оттович, доктор экономических наук, руководитель отдела системных исследований экономических проблем АПК филиала «Всероссийский институт аграрных проблем и информатики им. А.А.Никонова» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий - Всероссийский научно исследовательский институт экономики сельского хозяйства» (105064, Москва, Большой Харитоньевский пер., д. 21/6, стр.1), тел. 8(495) 628-59-42, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2587-2350>, ssiptits@viapi.ru

Романенко Ирина Анатольевна, доктор экономических наук, главный научный сотрудник отдела системных исследований экономических проблем АПК филиала «Всероссийский институт аграрных проблем и информатики им. А.А. Никонова» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий - Всероссийский научно исследовательский институт экономики сельского хозяйства» (105064, Москва, Большой Харитоньевский

пер., д. 21/6, стр.1.), тел. 8(495) 607-62-83, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4585-2659>, romanenko@viapi.ru

Евдокимова Наталья Егоровна, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник отдела системных исследований экономических проблем АПК филиала «Всероссийский институт аграрных проблем и информатики им. А.А.Никонова» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр аграрной экономики и социального развития сельских территорий - Всероссийский научно исследовательский институт экономики сельского хозяйства» (105064, Москва, Большой Харитоньевский пер., д. 21/6, стр.1.), тел. 8 (495) 623-14-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4585-2659>, nevdokimova@viapi.ru

Siptits O. Stanislav, doctor of economic sciences, head of the department of system studies of the economic problems of the agroindustrial complex of the All-Russian institute of agrarian problems and informatics named after A. A. Nikonov - branch of the Federal state budget scientific institution "Federal scientific center for Agrarian economics and social development of rural territories - All-Russian research institute of agricultural economics" (105064, Moscow, Bolshoy Kharitonievsky per., 21/6, p. 1), tel. 8 (495) 623-14-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2587-2350>, ssiptits@viapi.ru

Romanenko A. Irina, doctor of economic sciences, chief research officer of the department of system research of economic problems of the agro-industrial complex of the All-Russian institute of agrarian problems and informatics named after A. A. Nikonov - branch of the Federal state budget scientific institution "Federal scientific center for Agrarian economics and social development of rural territories - All-Russian research institute of agricultural economics" (105064, Moscow, Bolshoy Kharitonievsky per., 21/6, p. 1), tel. 8(495) 607-62-83, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4585-2659>, romanenko@viapi.ru

Evdokimova E. Natalia, candidate of economic science, leading researcher, of the department for system studies of the economic problems of the All-Russian institute of

agrarian problems and informatics named after A. A. Nikonov - branch of the Federal state budget scientific institution "Federal scientific center of Agrarian economics and social development of rural territories - All-Russian research institute of agricultural economics" (105064, Moscow, Bolshoy Kharitonievsky per., 21/6, p. 1), tel. 8 (495) 623-14-10, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6568-2063>, nevdokimova@viapi.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы низко углеродной трансформации агропродовольственных систем при изменении климата. Исследуется применение цифровых технологий и модельного инструментария для проектирования эффективных и устойчивых агропродовольственных систем с низким углеродным следом. В большинстве зарубежных моделей внешнее окружение представлено гидротермическими параметрами, полученными в результате прогнозных сценарных расчетов с помощью моделей общей циркуляции атмосферы. Климатические сценарии соответствуют сценарным предположениям о динамике социально-экономических параметров будущего мирового развития, таких как численность и доходы населения, потребительское поведение и пищевые предпочтения, цены на энергоресурсы и уровень применения альтернативных источников энергии (разработанным МГЭИК). Показано, что научным сообществом предлагаются самые разные способы решения этой задачи, однако неизменным остается потребность в нахождении компромисса между углеродным следом выпуска и экономической и социальной эффективностью и устойчивостью проектируемой системы. В ВИАПИ им. А.А. Никонова разработан комплекс взаимосвязанных моделей, информационных систем, баз данных, направленных на решение задачи оптимального планирования мероприятий с целью низко углеродной трансформации агропродовольственной системы региона. В разработанном комплексе учитываются характер зависимостей урожайности сельскохозяйственных культур от агроклиматического потенциала, связи, накладываемые на воспроизводство почвенного гумуса, севооборотные ограничения, поголовье и структура стада по видам сельскохозяйственных животных, а также пищевые предпочтения,

численность и доходы населения. Получаемые региональные продовольственные балансы позволяют сделать выводы о рисках нарушения продовольственной безопасности в результате реализации стратегий низко углеродной трансформации и откорректировать производственную структуру региональных агропродовольственных систем с целью уменьшения этих рисков.

Abstract. The article deals with the problems of low-carbon transformation of agri-food systems under climate change. The application of digital technologies and modeling tools for the design of efficient and sustainable agri-food systems with a low carbon footprint is being explored. In most foreign models, the external environment is represented by hydrothermal parameters obtained as a result of predictive scenario calculations using general atmospheric circulation models. Climate scenarios correspond to scenario assumptions about the dynamics of socio-economic parameters of future world development, such as the size and income of the population, consumer behavior and food preferences, energy prices and the level of use of alternative energy sources (developed by the IPCC). It is shown that the scientific community offers a variety of ways to solve this problem, but the need to find a compromise between the carbon footprint of production and the economic and social efficiency and sustainability of the designed system remains unchanged. In VIAPI them. A.A. Nikonov developed a set of interrelated models, information systems, databases aimed at solving the problem of optimal planning of activities for the purpose of low-carbon transformation of the agro-food system of the region. The developed complex takes into account the nature of the dependences of crop yields on the agro-climatic potential, the relationships imposed on the reproduction of soil humus, crop rotation restrictions, the number and structure of the herd by types of farm animals, as well as food preferences, the number and income of the population. The resulting regional food balance sheets make it possible to draw conclusions about the risks of food security violations as a result of the implementation of low-carbon transformation strategies and adjust the production structure of regional agro-food systems in order to reduce these risks.

Ключевые слова: агропродовольственные системы, землепользование, низко углеродная трансформация, моделирование, информационные системы, база данных, эффективность и устойчивость.

Keywords: agri-food systems, land use, low carbon transformation, modeling, information systems, database, efficiency and sustainability.

Введение. Производство продуктов питания и землепользование – одни из основных источников выбросов парниковых газов (далее – ПГ). Необходимость устойчивого и эффективного развития сельского хозяйства и связанного с ним землепользования сопряжена с выполнением задач в области продовольственной безопасности и защиты окружающей среды. Необходимы надежные структурированные данные о траекториях ключевых показателей изменения землепользования, эмиссии парниковых газов (далее – ЭПГ), продовольственной безопасности, оборота воды в сельском хозяйстве т.п.

Наша страна по Парижскому соглашению приняла на себя обязательства по достижению углеродной нейтральности национальной экономики к 2060 году. Несмотря на то, что в условиях санкций не все варианты развития актуальны, например, адаптация к европейскому трансграничному углеродному регулированию, но открываются новые возможности межгосударственного взаимодействия в области климата в рамках Парижского соглашения, особенно, со странами БРИКС.

Сложившаяся экономическая ситуация настоятельно требует, чтобы достижение целей Стратегии социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года было сбалансированным и не создавало несоразмерных обременений. Необходимо создавать свои цифровые активы по сбору и анализу углеродной отчетности, а также инструменты по разработке отраслевых стратегий низко углеродного развития с условиями соблюдения устойчивости и эффективности отраслевого развития. Также необходимо помнить при разработке такого инструментария, что аграрное землепользование напрямую сопряжено с обеспечением

продовольственной безопасности и воспроизводством почвенного плодородия сельскохозяйственных земель. Эту функциональную задачу осложняет изменение климата. Таким образом, возникает довольно сложная проблема поиска компромиссных решений, которые требуют разработки соответствующей сложности проблемы методологии и модельного инструментария проектирования эффективных и устойчивых АПС с низким углеродным следом. Термин проектирование в данном контексте означает процедуру нахождения только что перечисленных характеристик АПС, рассматриваемых и изменяющихся на интервале времени ее перехода из начального состояния в состояние, в котором достигается устойчивый компромисс между объемами ЭПГ и социально-экономическими характеристиками АПС. Практически речь идет о решении задачи оптимального планирования мероприятий с целью низко углеродной трансформации системы. Научным сообществом предлагаются самые разные способы решения этой задачи, однако неизменным остается потребность в разрешении компромисса между углеродным следом выпуска и экономической эффективностью АПС в стохастической среде, образованной изменениями климата и параметров экономического окружения. Эти внешние факторы могут быть заданы лишь с известной степенью определенности, поэтому всегда актуален вопрос об устойчивости компромиссных решений. Очевидно, что поиск обсуждаемых компромиссов должен осуществляться в некотором процессе, который будем называть проектированием региональной АПС. Результатом процесса проектирования является эффективная в указанном выше смысле конструкция АПС, фиксирующая размер, отраслевую структуру и технологические способы производства сельскохозяйственной продукции.

Современные зарубежные разработки в области низко углеродной трансформации сельского хозяйства исторически нацелены на сбор информации со всего мира и построение на этой основе глобальных моделей, применимых, как в планетарном, так и в национальном, и региональном масштабе. Основной подход в моделировании - модели комплексной оценки (Integrated assessment models - IAM) — это компьютерные модели, которые описывают потенциальную

эволюцию глобальной энергетической системы, а также других систем, выбрасывающих ПГ, таких как сельское хозяйство и землепользование.

Цели исследования. На основе мета-анализа зарубежного опыта оценить современные методы и структурные элементы моделей проектирования агропродовольственных систем (далее – АПС) с низким углеродным следом с учетом социо-эколого-экономических критериев и представить сравнительные особенности и практические задачи, решаемые разработанной в отделе системных исследований экономических проблем АПК ВИАПИ им. А.А. Никонова модели низко углеродной трансформации АПС региона.

Методы и модели. Рассмотрим структурные особенности и прикладные задачи, решаемые наиболее часто цитируемой при оценках эмиссии парниковых газов (далее – ЭПГ) глобальной модели для оценки конкуренции за землепользование между сельским хозяйством, биоэнергетикой и лесным хозяйством. Эта глобальная модель управления биосферой (GLObal BIOsphere Management model - **GLOBIOM**) была разработана и используется Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA) с конца 90-х годов [1]. Модель первоначально предназначалась для оценки воздействия политики смягчения последствий изменения климата в наземных секторах, включая производство биотоплива. В настоящее время ее все чаще применяют для прогнозирования рынков сельскохозяйственной и лесной продукции при применении мер регулирования с целью анализа экономического воздействия изменения климата и мер противодействия и адаптации к нему (снижения ЭПГ).

GLOBIOM - модель частичного равновесия с подходом «снизу-вверх» на основе подробной информации с геосетки о биофизических и технических затратах. Такая структура позволяет учитывать широкий набор параметров окружающей среды. Это рекурсивно-динамическая модель с горизонтом прогнозирования в 100 лет. Пространственное разрешение представляет собой совокупность пикселей от 5 до 30 угловых минут, принадлежащих к одной и той же высоте, склону и классу почвы, а также к одной и той же стране. Для сельскохозяйственных культур, домашнего скота и лесной продукции

производственные функции Леонтьева, охватывающие альтернативные системы производства, параметризуются биофизическими моделями EPIC или G4M.

GLOBIOM охватывает выбросы основных ПГ в результате сельского, лесного и другого землепользования на основе методики учета МГЭИК, включая N_2O от внесения синтетических удобрений и навоза в почву, N_2O от навоза, выпавшего на пастбища, CH_4 от выращивания риса, N_2O и CH_4 в результате обращения с навозом и CH_4 в результате энтеральной ферментации, а также выбросы/поглощение CO_2 в результате изменений надземной и подземной биомассы естественной растительности. Выбросы/абсорбция CO_2 от облесения, обезлесения, производства древесины в управляемых лесах оцениваются по географически явной ($0,5 \times 0,5^\circ$) модели G4M, связанной с GLOBIOM. Товарные рынки и международная торговля моделируются на уровне 37 агрегированных экономических регионов. Торговля моделируется в соответствии с подходом пространственного равновесия, основанным на конкурентоспособности затрат и предположении об однородности товаров, что позволяет отслеживать двусторонние торговые потоки между отдельными регионами.

Модель рассчитывает рыночное равновесие для сельскохозяйственной и лесной продукции, распределяя землепользование между видами производственной деятельности, чтобы максимизировать сумму излишков производителей и потребителей с учетом ограничений. GLOBIOM фиксирует множественные взаимосвязи между различными системами, участвующими в производстве продукции сельского и лесного хозяйства, например, динамику населения, изменения в социально-экономических и технологических условиях, экосистемах и климате, которые приводят к корректировке ассортимента продукции и использования земли и других ресурсов (рисунок 1).

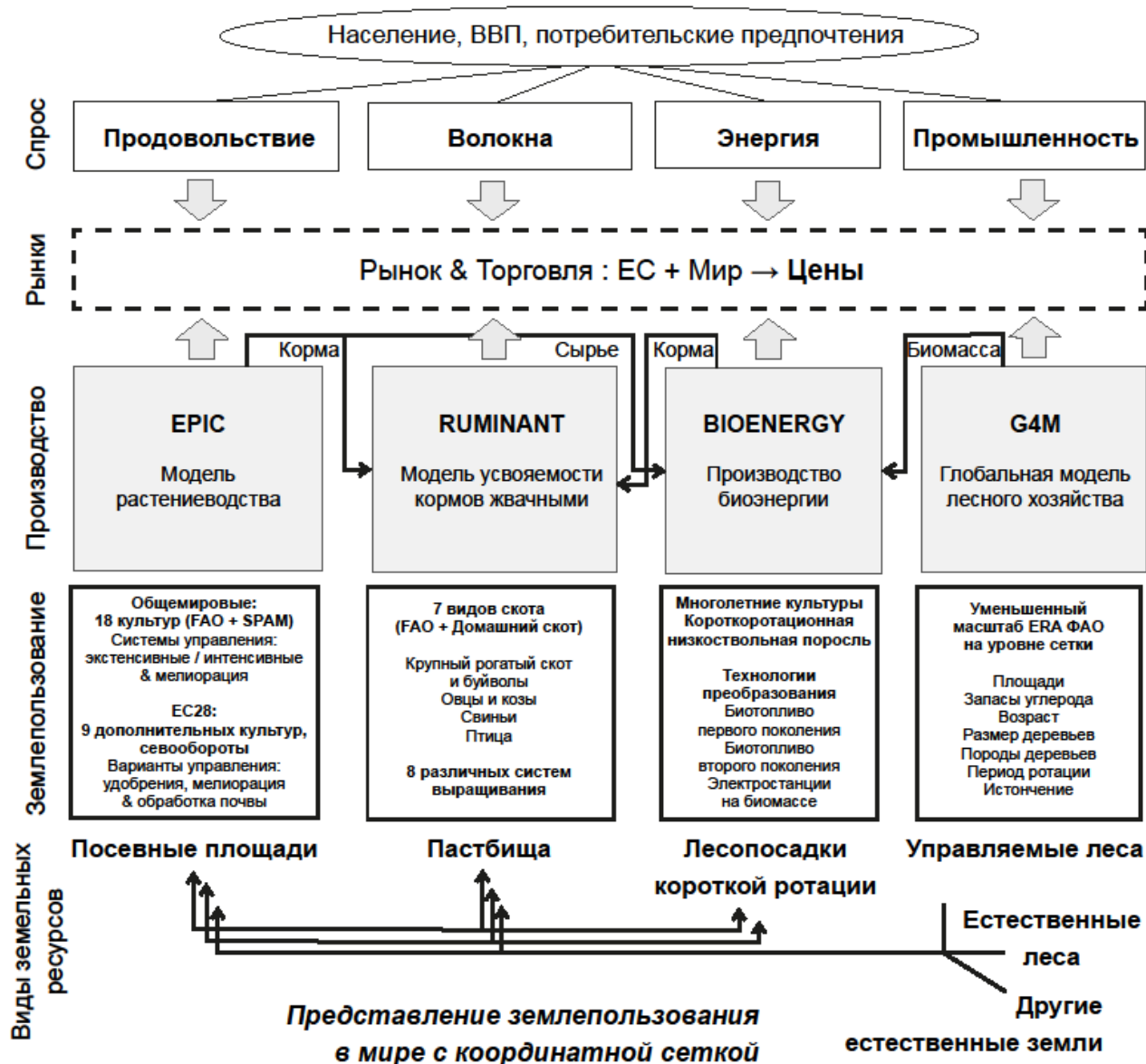


Рисунок 1 – Структура модели GLOBIOM.

Источник: переведено и адаптировано авторами из [1].

Модель GLOBIOM содержит полный набор вариантов снижения ЭПГ для АПС и лесного сектора, которые представлены в модели различными вариантами систем управления. Производители могут выбирать более эффективные методы управления ЭПГ, перераспределить производство в более продуктивные районы в пределах региона или через международную торговлю [1].

Модель оптимизации развития лесного и сельского хозяйства с учетом выбросов парниковых газов (FASOM-GHG - Forestry and Agricultural Sector Optimization Model - GreenHouse Gas version) представляет собой динамическую

модель математического программирования частичного равновесия эндогенную по цене, представляющую распределение земли и других ресурсов между и внутри сельскохозяйственного и лесного секторов штатов США [2]. Эта модель детально отражает рынки сельскохозяйственной и лесной продукции, статистику лесных инвентаризаций и сельскохозяйственных переписей, межотраслевую конкуренцию за ресурсы, а также все затраты на изменения в землепользовании и смягчения последствий изменения климата (рисунок 2).

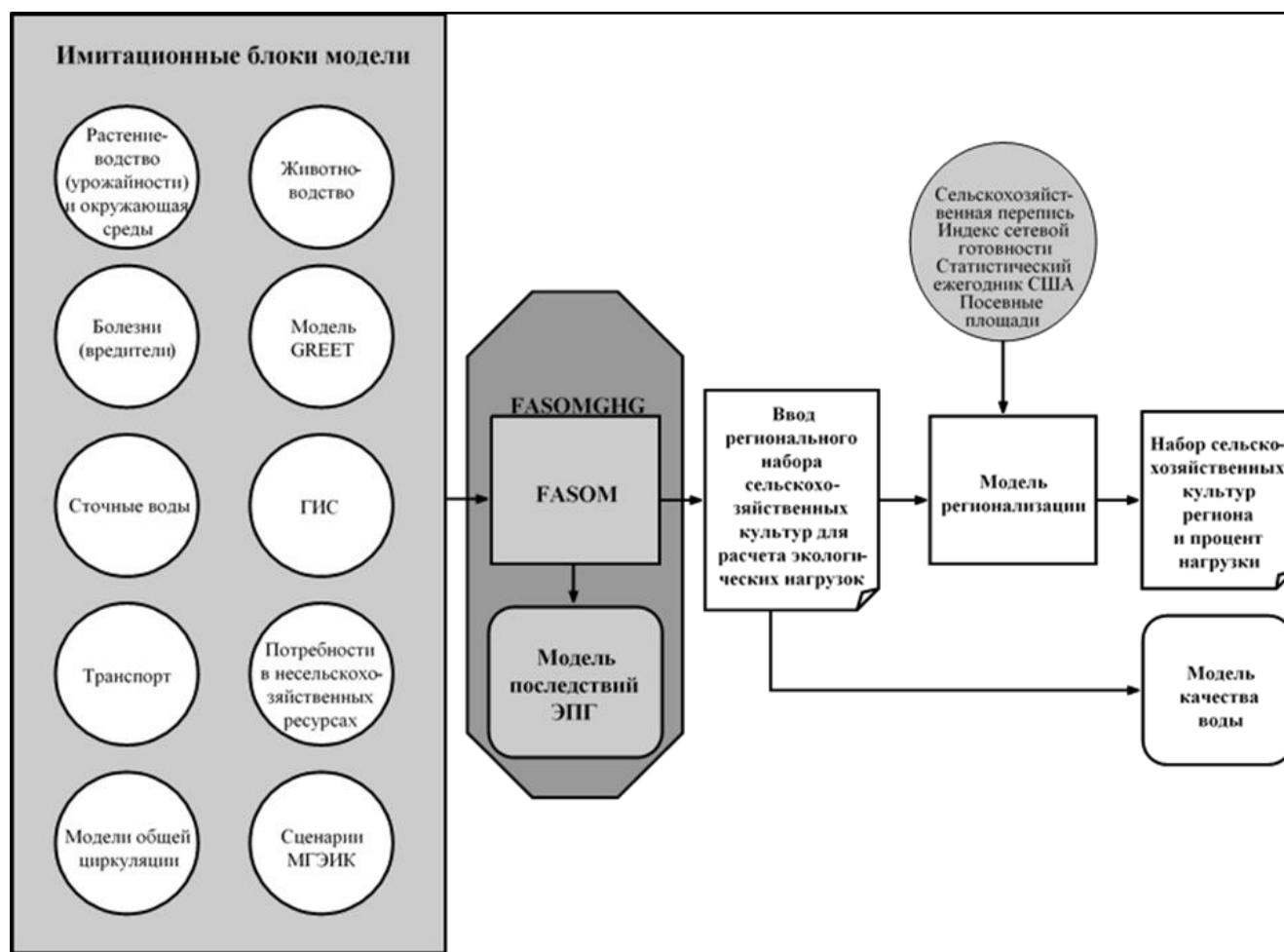


Рисунок 2 – Структура модели FASOM-GHG.

Источник: переведено и адаптировано авторами из [2] и [4].

Результаты расчетов FASOM-GHG дают в динамике по годам и штатам равновесные цены, объемы производства продукции, оценки мер регулирования, среднедушевое потребление, выбросы/поглощение ПГ (CO_2 , CH_4 , N_2O), загрязнение почв и подземных вод азотом, фосфором и другие эколого-экономические показатели в соответствии с выбранным сценарием. Эти

результаты показывают межотраслевые и региональные реакции на меры регулирования, на изменения климата, развитие биоэнергетики и других воздействий и изменений в окружающей среде. Критерием оптимизации FASOM-GHG является нелинейная функция, представляющую собой суммарный излишек выгоды производителей и потребителей на всех рынках товаров и факторов производства. FASOM-GHG - это модель математического программирования, поскольку в ней используются методы численной оптимизации для нахождения векторов цен и объемов на множестве рынков, которые одновременно максимизируют значение целевой функции с учетом набора ограничений. Модель реализована в среде GAMS.

Модель была разработана с целью оценки влияния мер государственного регулирования и экологических изменений, влияющих на сельское и лесное хозяйство, на благосостояние население и рынки. Модель FASOM-GHG и ее предшественники (модели FASOM и ASM) использовались для изучения влияния политики по снижению ЭПГ, воздействия изменения климата, оценки объемов заготовки древесины, федеральной поддержки производителей сельского и лесного комплексов, перспектив биоэнергетики и изменения окружающей среды [3]. Модельное решение отображает одновременное рыночное равновесие в течение продолжительного времени, обычно от 40 до 100 лет на основе пятилетнего временного шага.

Общий объем производства в модели равен общему потреблению, технические отношения «затраты-выпуск» сохраняются, а общая площадь землепользования в США должна оставаться постоянной. FASOM-GHG моделирует выделение земли с течением времени для конкурирующих видов деятельности как в лесном, так и в сельскохозяйственном секторах и связанное с этим воздействие на товарные рынки. Кроме того, модель имитирует воздействие на окружающую среду в результате изменения практики распределения земли и размещения производства, включая подробный учет изменений в чистых выбросах ПГ [4].

АПС сталкивается с многочисленными проблемами и должна быть преобразована не только с целью сокращения выбросов парниковых газов, но и для достижения множества других целей: улучшение питания и здоровья населения, снижение потребления не возобновляемых ресурсов и негативного влияния на окружающую среду, устойчивого и эффективного развития. Для обеспечения технической поддержки низко углеродной трансформации национальной АПС КНР в рамках этих многогранных вызовов, Китайский сельскохозяйственный университет (CAU) разрабатывает междисциплинарную модель АПС (модель CAU-AFS), объединяющую факторы, относящиеся к сельскому хозяйству, производству продовольствия, питанию населения, экономике и окружающей среде. Модель CAU-AFS интегрирует две основные модели — Китайской сельскохозяйственной модели пространственного равновесия и Китайской вычислимой модели общего равновесия, которые гибко связаны с другими моделями в области сельскохозяйственного производства, природных ресурсов, питания и здоровья, такими как модели изменения климата, водных ресурсов, производственных процессов при возделывании сельхозкультур, питания и т. д. Она незаменима в качестве платформы для имитации и анализа сочетанного воздействия на АПС мер регулирования и внешних шоков. Структура модели, сложившаяся к настоящему времени CAU-AFS, изображена на рисунке 3, но она постоянно совершенствуется и дополняется [5].

Вычислимая модель общего равновесия представляет собой систему народного хозяйства Китая. Она описывает состояние равновесия на всех рынках и устанавливает связи между различными секторами, охватывая все аспекты производства, потребления и торговли. Китайская матрица социального учета (SAM) в модели включает последние по времени таблицы затраты-выпуск, охватывающие 153 сектора, в том числе 23 сельскохозяйственных подсектора, 15 секторов пищевой промышленности и переработки сельскохозяйственной продукции, 2 сектора промежуточного производства химических удобрений и пестицидов и 48 секторов промышленности и услуг. Сельскохозяйственные подотрасли включают 14 сельскохозяйственных культур (рис, пшеница, кукуруза,

другие зерновые, бобы, арахис, рапс, хлопок, сахарный тростник, сахарная свекла, фрукты, овощи, табак-сырец и другие культуры) и 6 животноводческих отраслей (свинина, говядина, баранина, птица, яйца и молоко), а также лесное хозяйство, водные продукты и сельскохозяйственные услуги. Кроме того, домохозяйства разделены на 40 групп в зависимости от их местонахождения (городское или сельское) и уровня дохода, что можно использовать для анализа различных воздействий на разные группы домохозяйств.

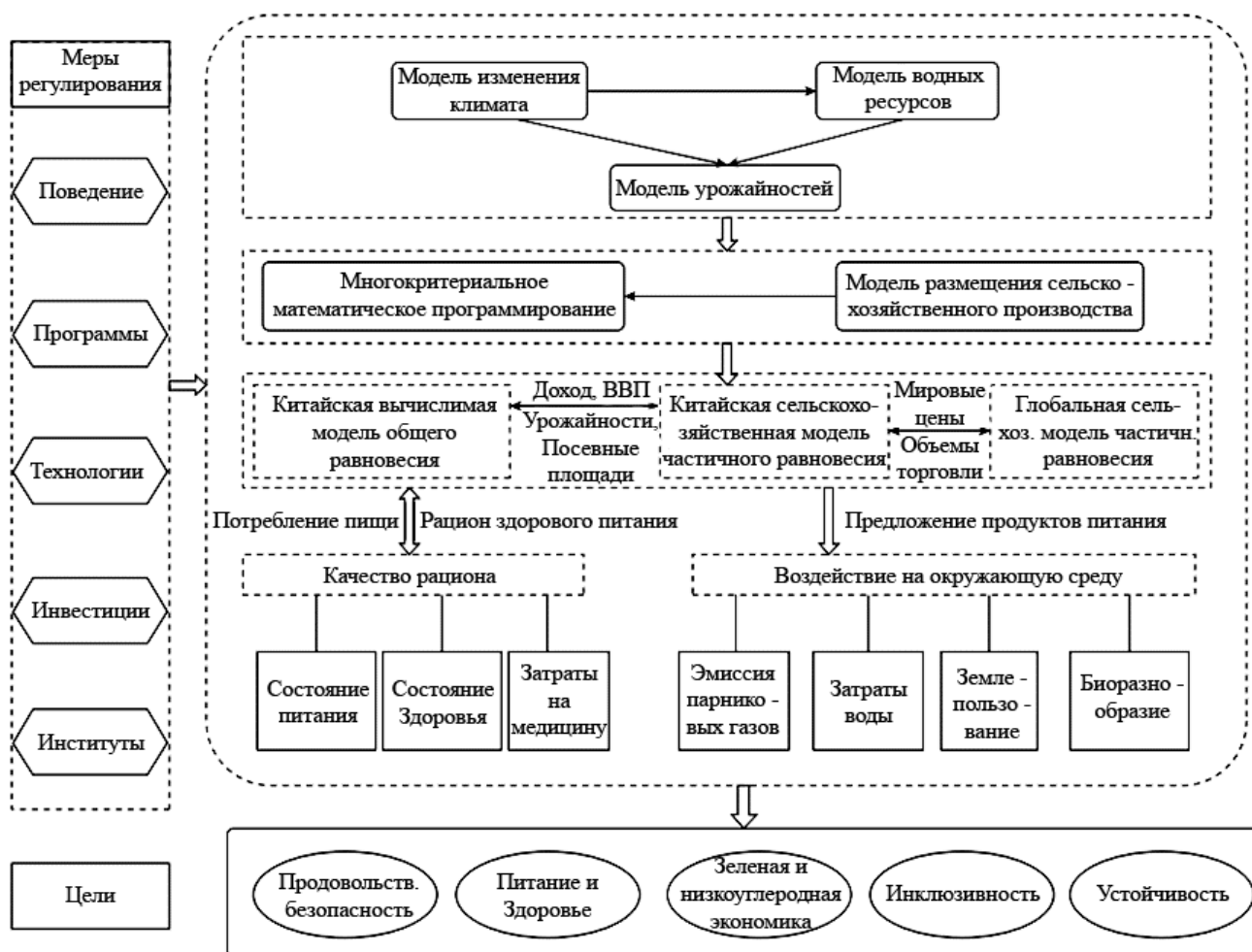


Рисунок 3 - Структура модели CAU-AFS.

Источник: переведено и адаптировано авторами из [5].

Общая ЭПГ от АПС может быть рассчитана с использованием коэффициентов выбросов углерода от различных сельскохозяйственных продуктов, сельскохозяйственной и пищевой промышленности, а также

промежуточных ресурсов. Среди них выбросы сельскохозяйственных культур в основном включают выбросы от растительных остатков, сжигания соломы, использования удобрений и возделывания рисовых полей.

Уравнения модели основаны на методике ФАО, которая включает предполагаемую структуру выбросов от использования удобрений различными культурами, а также использование удобрений на единицу площади различных культур. Влияние изменения землепользования на выбросы ПГ в этой модели пока не учитывалось. Коэффициенты выбросов на единицу продукции животноводства взяты из базы данных ФАО (FAOSTAT), которая в основном включает энтеральную ферментацию и выбросы в процессе обращения с навозом. Согласно базовому сценарию выбросы АПС Китая демонстрируют тенденцию к снижению, в основном в результате планируемой смены технологий и повышения эффективности использования энергии.

В DREMFIA представлены производство, затраты, потребление, внешняя торговля и ценообразование, а также система поддержки сельского хозяйства. Никаких явных связей с другими секторами национальной экономики нет. Сельское хозяйство составляет небольшую часть финской экономики и мало влияет на другие отрасли. Эти связи неявно описываются тенденциями потребления, ценовой эластичностью спроса, ценой труда и инфляцией. Структура модели представлена на рисунке 4.

Модель DREMFIA включает в себя следующую производственную деятельность по регионам: количество различных животных, площадей, занятых различными культурами, кормовых рационов животных, использование химических и органических удобрений и результирующие урожаи сельскохозяйственных культур. В модель не включены: садоводство, разведение ягнят, северных оленей, лошадей и пушных зверей, которые являются незначительными с точки зрения выбросов ПГ. Расчет ЭПГ в модели DREMFIA соответствует параметрам статистики инвентаризации ПГ в Финляндии и учитывает более 95% выбросов в эквиваленте CO₂.



Рисунок 4 - Структура модели DREMFA.

Источник: переведено и адаптировано авторами из [6].

Целью модельного эксперимента на модели финского сельского хозяйства была задача изучения возможностей значительного сокращения ЭПГ в аграрном секторе. Исследование, выполненное на модели DREMFA сельскохозяйственного сектора Финляндии, показывает, как изменения в рационе питания и землепользовании могут сократить ЭПГ и каково их влияние на региональные показатели производства, землепользования и доходы фермерских хозяйств.

Результаты модельных экспериментов показывают, что трудно добиться значительного сокращения ЭПГ просто изменив рацион питания потребителей. Согласно сценариям изменения рациона питания, будет большое неравенство в распределении доходов фермерских хозяйств между четырьмя основными сельскохозяйственными регионами Финляндии из-за радикального сокращения

потребления продуктов животноводства. Однако меры по изменению землепользования сами по себе не создают неравенства в доходах фермерских хозяйств между различными регионами по сравнению со сценариями изменения рациона питания, а также позволяют значительно сократить ЭПГ. Сочетание изменения как рационов питания населения, так и использования сельскохозяйственных земель, является наиболее эффективной стратегией снижения ЭПГ в сельском хозяйстве. Однако, существует проблема в том, как обеспечить справедливый переход для фермеров в регионах, где преобладает животноводство, с плохими условиями выращивания особых культур (например, бобовых) и слабыми возможностями трудоустройства. Субсидия для компенсации относительно больших выбросов с органогенных почв может обеспечить лишь частичную компенсацию дохода. Неблагополучные регионы Финляндии нуждаются в помощи при переходе к низко углеродным технологиям.

Результаты и обсуждение. Проведенный анализ применяемых методов и моделей за рубежом для анализа и проектирования стратегических решений по управлению процессом низко углеродной трансформации региональных АПС показывает, что при моделировании внешнее окружение представляется гидротермическими параметрами климатических сценариев, получаемых из результатов прогнозных расчетов моделей общей циркуляции атмосферы. Климатические параметры определяют урожайности сельскохозяйственных культур, а также ЭПГ. Климатические сценарии при этом соответствуют сценарным предположениям о динамике социально-экономических параметров будущего мирового развития, таких как численность и доходы населения, потребительское поведение и пищевые предпочтения, цены на энергоресурсы и уровень применения альтернативных источников энергии. Результатом сценарных расчетов является уровень достижения углеродной нейтральности АПС в долгосрочной перспективе. Такие же подходы были использованы в ВИАПИ им. А. А. Никонова при разработке комплекса моделей, информационно-аналитических систем и базы данных для проектирования АПС с низким углеродным следом (рисунок 5).

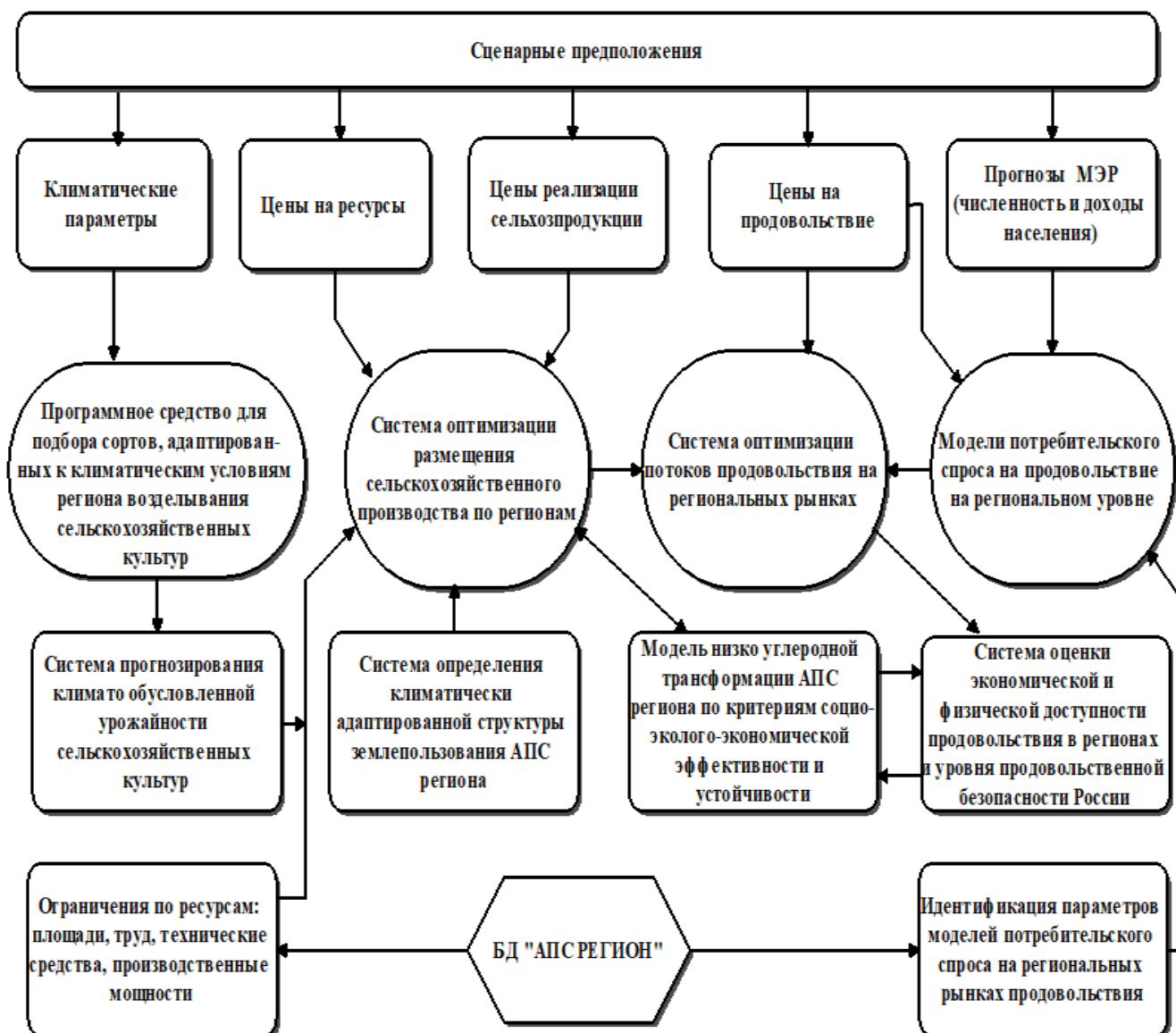


Рисунок 5 - Комплекс моделей, информационно-аналитических систем и базы данных для проектирования АПС с низким углеродным следом

Источник: разработано авторами.

Как видно из рисунка 5, внешними параметрами, задаваемыми в форме сценарных предположений, являются климатические характеристики, цены на ресурсы, продукцию реализации АПС, потребительские цены, численность и доходы населения. Цены реализации сельскохозяйственной продукции (цены производителей), являясь внешней информацией, могут корректироваться по результатам решения модели частичного равновесия на оптовых рынках продовольствия (модель ВИАПИ, [9]).

Представленный на рисунке 5 программный и модельный инструментарий состоит из нескольких автономных моделей и программных модулей, включая базу данных АПС. Прежде всего, речь идет о производственных функциях урожайностей в связи с прогнозируемыми сценариями климатической динамики и программном средстве, применяемом для формирования списка адаптированных к климатическим изменениям сортов возделываемых культур, соответствующих агроклиматическому потенциалу регионов [10-12].

Оценка отраслевых структур растениеводства в связи с балансом гумуса с возможностью получения частных оптимальных решений (максимум прибыли растениеводства при условии неотрицательных темпов воспроизводства гумуса), выполняется с использованием программного средства «Программа климатической адаптации производственной структуры АПС региона Российской Федерации» [13]. Результатом решения является структура площадей основных сельскохозяйственных культур с учетом паров, а также необходимые дозы внесения органических удобрений на гектар севооборотной площади, обеспечивающие простое воспроизводство гумуса.

Потребление продовольствия определяется исходя из региональных особенностей потребительского поведения населения регионов, прогнозной численности и душевых доходов. Для этого применяются эконометрические модели спроса, где среднедушевое потребление каждого вида продовольствия зависит от цены единицы продукта и среднедушевого дохода. Калибровка моделей спроса происходит с помощью базы данных «АПС-Регион», содержащей динамические ряды среднедушевого потребления мяса и мясопродуктов, молока и молокопродуктов, картофеля, овощей, яиц за период с 1995 по 2022 годы. Также в базе данных присутствует информация о доходах населения и ценах на продовольствие по регионам России за тот же период.

В результате возникает целостная картина процесса низко углеродной трансформации сельского хозяйства – от характеристик адаптирующихся систем ведения сельского хозяйства в регионах, до межрегионального обмена

продовольствием, душевого потребления, оценок импортно-экспортных операций, финансовых результатов субъектов агропродовольственных рынков.

Очевидно, что не всякая стратегия низко углеродной трансформации гарантирует максимально эффективную работу АПС региона, понимаемую с эколого-экономических позиций, например, как максимизацию ежегодного экономического результата, приходящегося на единицу ЭПГ. В масштабах региональных АПС характеристики социальной эффективности тесно связаны с экономическими результатами их деятельности. В данной работе понятие социальной эффективности понимается в узком смысле, как, по меньшей мере, не ухудшение степени обеспечения продовольствием населения региона в процессе трансформации.

Для решения таких задач в контур системы управления включена математическая модель АПС, а сам процесс ее низко углеродной трансформации связан с нахождением оптимальных управляющих воздействий, к которым относятся следующие функции времени:

- обмена площадями между категориями земель (пашня, и многолетние насаждения, пастбища, сенокосы, залежь и неиспользуемые земли сельскохозяйственного назначения, лесные массивы),
 - структура площадей севооборотных массивов на пашне,
 - программа применения минеральных и органических удобрений,
 - структура рационов кормления сельскохозяйственных животных,
 - параметры воспроизводства стад сельскохозяйственных животных,
 - технологические параметры, характеризующие способы производства в отраслях сельского хозяйства.

Поиск решений происходит при выполнении следующих ограничений:

- на общую площадь земельных ресурсов АПС,
- на соотношение классов сельскохозяйственных культур в севооборотах,
- на площадь многолетних насаждений,
- на воспроизводство почвенного гумуса (простое или расширенное),

- на максимальные дозы азотных удобрений для предотвращения выноса с грунтовыми водами,
- на полное использование произведенных органических удобрений,
- на зоотехнические параметры, определяющие процессы воспроизводства в страдах сельскохозяйственных животных.

В модели на интервале в 30 лет моделируется динамика структуры землепользования в составе следующих категорий: пашня, пастбища и сенокосы, многолетние насаждения, залежи, лесной массив, моделируется процесс воспроизводства стада молочных коров, формирование кормовой базы, зоотехнические стратегии и структура рационов кормления. В качестве критерия используется ежегодная максимизация отношения дисконтируемого валового дохода к ЭПГ. Учтены три вида ПГ: CO_2 , CH_4 , N_2O . Оценки производства ПГ выполнены с использованием имеющейся нормативной базы, которая была изложена в работе [8].

Заключение. Как мы видим по представленным в данной работе зарубежным моделям, традиционный инструментарий моделирования развивается за пределы эконометрических моделей и моделей равновесия. Трансформационные изменения требуют структурных и дезагрегированных моделей. Необходимы системы моделирования, основанные как на экономической теории, так и на выполнении биофизических законов, лежащих в основе функционирования АПС.

Для обоснования эффективных стратегий низко-углеродной трансформации АПС регионов с помощью разработанного комплекса моделей, информационно-аналитических систем и базы данных со стороны производства агропродовольственной продукции учитываются:

- 1) характер зависимостей урожайности сельскохозяйственных культур от доступных элементов питания растений, ограниченных почвенными запасами элементов питания растений, объемами минеральных и органических удобрений;
- 2) связи, накладываемые на воспроизводство почвенного гумуса;
- 3) севооборотные ограничения;

4) поголовье и структура стада по видам сельскохозяйственных животных.

В результате определяется валовое производство сельскохозяйственной продукции, корректируется ЭПГ на пашне.

Со стороны потребления учитываются пищевые предпочтения, численность и доходы, что определяет потребительское поведение населения регионов.

Получаемые в результате расчетов региональные продовольственные балансы позволяют сделать выводы о рисках нарушения продовольственной безопасности страны в результате реализации стратегий низко углеродной трансформации и провести корректировки в производственной структуре региональных АПС с целью уменьшения этих рисков.

Стратегия трансформации региональных АПС в направлении уменьшения ЭПГ может быть реализована разными способами. Самый простой, и очевидный способ базируется на знаниях качественного характера: в землепользовании – увеличение доли земель-аккумуляторов органического вещества. Это могут быть лесные массивы, луга и заболоченные участки территории. На пахотных землях – организация достаточно сложных севооборотов и использование технологий, накапливающих гумус в почвенном слое. В отраслях животноводства – сдвиг в сторону уменьшения поголовья крупного рогатого скота, строгое выполнение зоотехнических рекомендаций в отношении качества кормовой базы, адекватные технологии накопления, хранения и использования навоза. Для реализации такой стратегии достаточно наличия соответствующей нормативной базы, мониторинговых, контрольных и консультационных служб. Все это в совокупности образует систему управления АПС, функционирующую в соответствии с принципами низко углеродной экономики.

Литература

1. Havlík P. et al. GLOBIOM documentation //International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. – 2018.
2. EPA. United States Environmental Protection Agency. FASOM-GHG: https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/systmreg/resourcedetail/general/description/description.do?infoResourcePkId=11884

3. Beach R. H., Zhang Y. W., McCarl B. A. Modeling bioenergy, land use, and GHG emissions with FASOM-GHG: model overview and analysis of storage cost implications //Climate Change Economics. – 2012. – Т. 3. – №. 03. – С. 1250012. - DOI:10.1142/S2010007812500121.
4. Ohrel S. B. et al. Model Documentation for the Forest and Agricultural Sector Optimization Model with Greenhouse Gases (FASOM-GHG) //RTI International. RTI Project. – 2010. – №. 0210826.016.
5. AGFEP, CARD, CIFAE, IAED and IFPRI. 2022. Reforming agricultural support policy for transforming agrifood systems: China and Global Food Policy Report 2022. Beijing, China: China Agricultural University. <https://agfep.cau.edu.cn/module/download/downloadfile.jsp?classid=0&filename=66e4d877d5fe4c9e9762228dfb477c6d.pdf>
6. Lehtonen H., Huan-Niemi E., Niemi J. The transition of agriculture to low carbon pathways with regional distributive impacts //Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2022. – Т. 44. – С. 1-13.
7. Lehtonen H. et al. Principles, structure and application of dynamic regional sector model of Finnish agriculture. – Helsinki University of Technology, 2001.
8. Разработать методологию низко углеродной трансформации региональных агропродовольственных систем с учетом критериев их социо-эколого-экономической эффективности и устойчивости в процессе адаптации к климатическим изменениям: отчет о НИР ВИАПИ им. А.А. Никонова - филиала ВНИИЭСХ № 1021060207512-9-4.5.1. / С.О. Сиптиц, И.А. Романенко и др.- Москва, 2022. - 195 с.
9. Svetlov N. VIAPI model as a component of information technology for strategic planning of agri-food systems //Available at SSRN 3984882. – 2021.
10. Сиптиц, С. О. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России / С. О. Сиптиц, И. А. Романенко, Н. Е. Евдокимова // Проблемы прогнозирования. – 2021. – № 2(185). – С. 75-86.

11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019618829 РФ. Программа для выбора сортов сельскохозяйственных культур при адаптации к изменениям климата в регионах : № 2019617697 : заявл. 25.06.2019 : опубл. 05.07.2019 / В. М. Костусьяк, С. О. Сиптиц, И. А. Романенко ; заявитель ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ.

12. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020661764 РФ. Программа долгосрочного прогноза урожайностей зерновых и зернобобовых культур с учетом климатической динамики : № 2020660621 : заявл. 16.09.2020 : опубл. 30.09.2020 / В. М. Костусьяк, С. О. Сиптиц, И. А. Романенко ; заявитель ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ.

13. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022665806 РФ. Программа климатической адаптации производственной структуры агропродовольственной системы региона Российской Федерации : № 2022665086 : заявл. 11.08.2022 : опубл. 22.08.2022 / В. М. Костусьяк, С. О. Сиптиц, И. А. Романенко ; заявитель ФГБНУ ФНЦ ВНИИЭСХ.

References

1. Havlík P. et al. GLOBIOM documentation //International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria. – 2018.
2. EPA. United States Environmental Protection Agency. FASOM-GHG: https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/systmreg/resourcedetail/general/description/description.do?infoResourcePkId=11884
3. Beach R. H., Zhang Y. W., McCarl B. A. Modeling bioenergy, land use, and GHG emissions with FASOM-GHG: model overview and analysis of storage cost implications //Climate Change Economics. – 2012. – Т. 3. – №. 03. – С. 1250012. - DOI:10.1142/S2010007812500121.
4. Ohrel S. B. et al. Model Documentation for the Forest and Agricultural Sector Optimization Model with Greenhouse Gases (FASOM-GHG) //RTI International. RTI Project. – 2010. – №. 0210826.016.
5. AGFEP, CARD, CIFAE, IAED and IFPRI. 2022. Reforming agricultural support policy for transforming agrifood systems: China and Global Food Policy Report

2022. Beijing, China: China Agricultural University.
<https://agfep.cau.edu.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&filename=66e4d877d5fe4c9e9762228dfb477c6d.pdf>

6. Lehtonen H., Huan-Niemi E., Niemi J. The transition of agriculture to low carbon pathways with regional distributive impacts //Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2022. – T. 44. – C. 1-13.

7. Lehtonen H. et al. Principles, structure and application of dynamic regional sector model of Finnish agriculture. – Helsinki University of Technology, 2001.

8. Razrabotat' metodologiyu nizko uglerodnoj transformacii regional'nyh agroproduktivnykh sistem s uchetom kriteriev ih socio-ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti i ustojchivosti v processe adaptacii k klimaticheskim izmeneniyam: otchet o NIR VIAPI im. A.A. Nikonova - filiala VNIIESKH № 1021060207512-9-4.5.1. / S.O. Siptic, I.A. Romanenko i dr.- Moskva, 2022. - 195 s.

9. Svetlov N. VIAPI model as a component of information technology for strategic planning of agri-food systems //Available at SSRN 3984882. – 2021.

10. Siptic, S. O. Model'nye ocenki vliyaniya klimata na urozhajnost' zernovykh i zernobobovykh kul'tur v regionah Rossii / S. O. Siptic, I. A. Romanenko, N. E. Evdokimova // Problemy prognozirovaniya. – 2021. – № 2(185). – S. 75-86.

11. Svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM № 2019618829 RF. Programma dlya vybora sortov sel'skohozyajstvennykh kul'tur pri adaptacii k izmeneniyam klimata v regionah : № 2019617697 : zayavl. 25.06.2019 : opubl. 05.07.2019 / V. M. Kostusyak, S. O. Siptic, I. A. Romanenko ; zayavitel' FGBNU FNC VNIIESKH.

12. Svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM № 2020661764 RF. Programma dolgosrochnogo prognoza urozhajnostej zernovykh i zernobobovykh kul'tur s uchetom klimaticheskoy dinamiki : № 2020660621 : zayavl. 16.09.2020 : opubl. 30.09.2020 / V. M. Kostusyak, S. O. Siptic, I. A. Romanenko ; zayavitel' FGBNU FNC VNIIESKH.

13. Svidetel'stvo o gos. registracii programmy dlya EVM № 2022665806 RF. Programma klimaticheskoy adaptacii proizvodstvennoj struktury agroproduktivnoy

sistemy regiona Rossijskoj Federacii : № 2022665086 : zayavl. 11.08.2022 : opubl. 22.08.2022 / V. M. Kostusyak, S. O. Siptic, I. A. Romanenko ; zayavitel' FGBNU FNC VNIIESKH.

© Сиптиц С.О., Романенко И.А., Евдокимова Н.Е., 2021. *International agricultural journal*, 2023, № 4, 1000-1024.

Для цитирования: Сиптиц С.О., Романенко И.А., Евдокимова Н.Е. МОДЕЛИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ И УСТОЙЧИВЫХ АГРОПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ СИСТЕМ С НИЗКИМ УГЛЕРОДНЫМ СЛЕДОМ //International agricultural journal. 2023. № 4, 1000-1024.